

# 마찰저항이 연속누출과 순간누출을 가지는 액체 풀의 확산에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

김태훈<sup>†</sup> · 최병일 · 김명배 · 도규형 · 한용식  
한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실

## Effect of Frictional Resistance Force on a Liquid Pool Spreading Model with Continuous and Instantaneous Release

TAE HOON KIM<sup>†</sup>, BYUNG-IL CHOI, MYUNGBAE KIM, KYU HYUNG DO, YONG-SHIK HAN  
Department of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Korea

**Abstract** >> In this study, solutions for a liquid pool spreading model with continuous and instantaneous release are discussed based on the model used in the FERC's report. The effects of the release time on the liquid pool volume and radius are investigated for the continuous release. For the continuous release with the frictional resistance force in the liquid pool spreading model, the vaporization time decreases as the release time increases. On the other hand, for the continuous release without the frictional resistance force in the liquid pool spreading model, the vaporization time increases as the release time increases. These phenomena are deeply related to the pool radius. In addition, the effects of the initial pool radius for the instantaneous release in the liquid pool spreading model are discussed. For the case with the frictional resistance force in the liquid pool spreading model, as reducing release time in the model with the frictional resistance force for the continuous release, the solution for a continuous release approaches to that for an instantaneous release. On the contrary to this, the pool volume and radius for the instantaneous release without the frictional resistance force are totally different from those for the continuous release without the frictional resistance force.

**Key words** : Pool spreading(풀 확산), Continuous release(연속누출), Instantaneous release(순간누출), Frictional resistance force(마찰력), Vaporization time(증발시간)

### Nomenclature

$C_f$ : frictional resistance force,  $m/s^2$

$g_r$ :  $g(\rho_w - \rho_l)/\rho_w$ ,  $m/s^2$

$h$  : pool height, m

$m_b$ : burning rate,  $kg/m^2 s$

$Q$  : release rate from a tank.  $m^3/s$

$r$  : pool radius, m

$s$  : pool height ratio

$t$  : time, sec

$u$  : spreading velocity, m/s

<sup>†</sup>Corresponding author : thkim79@kimm.re.kr

[ 접수일 : 2013.10.01 수정일 : 2013.11.05 게재확정일 : 2013.12.31 ]

Copyright © 2013 KHNES

$V$  : pool volume,  $m^3$

## Greek symbols

$\rho$  : density,  $kg/m^3$

$\tau$  : release time, sec

$\phi$  : shape factor

## Subscripts

$f$  : leading edge

$i$  : initial state

$l$  : liquid

$w$  : water

## 1. 서 론

액상의 가연성이나 유독성 물질을 취급하고 있는 산업 현장에서 주요 사고는 그 물질의 누출로부터 시작되기 때문에 누출된 액체의 확산에 대한 연구는 액화수소나 LNG 등의 위험도를 정량화하기 위하여 필수적이다. 이에 따라 액체의 확산과정에 대한 여러 가지 모델에 대하여 기존 연구자들은 다양한 연구를 수행하여 왔다<sup>1-5)</sup>.

여러 가지 모델 중에 본 연구에서는 FERC<sup>6)</sup>에서 제시한 모델을 고려하고자 한다. FERC<sup>6)</sup>에서 제시한 모델을 바탕으로 연속누출과 순간누출을 가지는 액체 풀의 확산에 관한 해석적 연구를 수행하고자 한다. 특히 액체 풀의 확산 모델에서 마찰력이 연속누출과 순간누출의 풀의 확산에 미치는 영향에 대하여 알아보하고자 한다. 또한 연속누출의 경우에서 누출시간이 액체 풀의 부피와 반경 변화에 미치는 영향에 대하여 조사하고자 한다. 부가적으로 연속누출에서 누출 시간을 줄일 경우의 액체 풀의 확산 현상이 순간누출의 액체 풀의 확산 현상과 어떻게 차이가 나

는지 조사하고자 한다.

## 2. 모델 정의

### 2.1 확산 풀에서의 질량 보존

확산 풀에서의 질량 보존을 우선 고려하고자 한다. 액체는 액체를 보관하고 있는 용기(Tank)로부터 풀로 공급이 되고 액체는 풀에서 주변으로 증발된다. 액체가 풀에서부터 주변으로 증발되는 메커니즘은 바닥으로부터 풀로의 전도 열전달, 풀에서 주변으로의 대류 열전달, 액체가 용기로부터 풀로 누출된 후 불이 붙음으로 인한 불에 의한 증발로 구별할 수 있다. 본 논문에서는 세 가지 메커니즘 중에 풀에 불이 붙음으로 생기는 열전달만이 유일하게 존재한다고 가정한다. 즉, 액체가 누출된 후에 바로 불이 붙었다고 가정하고 이 때의 풀화재에 따른 열전달만이 유일하다고 가정한다. LNG 풀에서의 연소를 고려한다면, 이 때의 증발률( $m_b$ )는  $0.282kg/m^2 \cdot s$ 이며 이 때의 증발 열유속은  $143kW/m^2$  이다<sup>6)</sup>. 식 (1)은 확산 풀에서의 질량보존 관련 지배 방정식이다.

$$\frac{dV}{dt} = Q - \frac{(\pi r^2) m_b}{\rho_l} \quad (1)$$

식 (1)의 우변의 첫 번째 항은 용기로부터 풀로 누출되는 액체의 유량을 의미하고 두 번째 항은 풀에서 주변으로 증발되는 액체의 양을 의미한다. 본 연구에서는 풀의 단면 형상을 원으로 가정한다. 이에 따라 식 (1)의 두 번째 항에서 풀의 단면적은  $\pi r^2$ 로 표현된다.

### 2.2 액체 풀 확산 모델

LNG를 보관하고 있는 용기는 다양한 환경 위에 놓일 수 있다. 본 연구에서는 LNG 용기에서 액체가

땅 위로 누출되는 경우를 고려하고자 한다. 본 연구에서는 땅 표면위로의 LNG 확산 모델로서 van der Bosch and Weterings<sup>7)</sup>이 제시한 모델을 사용하고자 한다. 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{du}{dt} = \frac{4g_r\Phi h}{r} - C_f \quad (2)$$

여기서  $g_r$  은  $g(\rho_w - \rho_l)/\rho_w$ 로 정의된다. 식 (2)의 우변의 첫 번째 항은 중력에 의한 구동력이며 두 번째 항은 마찰력이다. 풀의 확산은 중력과 마찰력의 평형에 의해 지배된다.  $\Phi$ 는 풀의 모양과 관련 있기 때문에 형상함수라고 불린다. 형상함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Phi(s) = \begin{cases} 1-s & \text{if } s < 2 \\ -s^2/4 & \text{if } s \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

마찰저항( $C_f$ )은 지면과 풀 사이의 마찰에 의한 저항으로서 지면저항(Ground resistance)이라고 말할 수 있으며 풀의 확산 유동이 층류 유동이나 난류 유동이나에 따라 달라진다. 마찰저항에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 나와 있다<sup>7)</sup>.

### 3. 결과 및 토의

위에서 제시한 식 (1)과 (2)는 Euler method, Runge-Kutta method 등의 수치 해석 방법을 이용하여 풀 수가 있다. 본 연구에서는 용기로부터 누출되는 총 액체의 양을  $\pi(m^2)$ 으로 가정한다. 본 연구에서 고려하고자 하는 누출 방식은 두 종류이다. 하나는 연속 누출이고 다른 하나는 순간 누출이다. 연속 누출의 물리적 의미는 액체가 용기로부터 일정한 시간 동안 일정하게 누출된다는 것이다. 반대로 순간 누출은 용기로부터 액체가 누출되는 시간이 풀에서 액체가 모두 증발할 때 걸리는 시간보다 매우 작은 경우를 의미한다. 본 연구에서는 연속 누출과 순간

누출에 따른 풀의 확산 현상이 어떻게 다른지를 해석적으로 살펴본다. 또한 마찰저항( $C_f$ )이 액체 풀의 확산 현상에 미치는 영향을 살펴본다.

#### 3.1 연속 누출

본 절에서는 연속 누출의 경우 누출 시간에 따른 풀의 확산 현상이 어떻게 다른지를 살펴보기 위해 총 누출량이 일정할 때 누출 시간( $\tau$ )이 Fig. 1과 같이 다른 총 네 가지의 경우를 살펴본다.

##### 3.1.1 마찰저항을 고려한 액체 풀의 확산

먼저 액체 풀의 확산에서 마찰저항을 고려한 경우

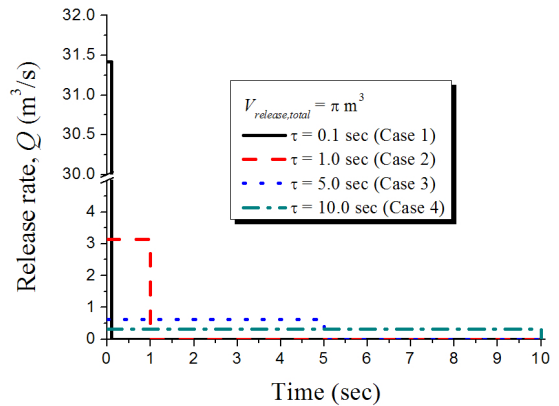


Fig. 1 Release rates for continuous release

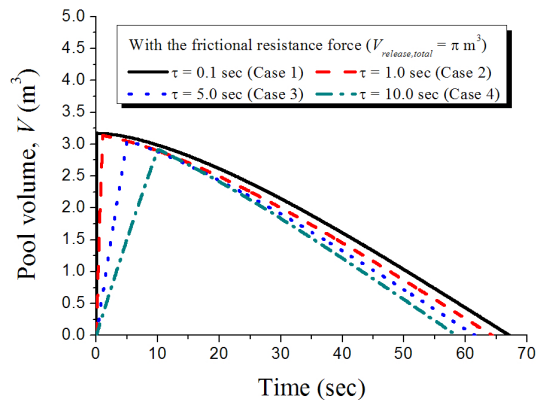


Fig. 2 Pool volume for continuous release in liquid pool spreading model with the friction resistance term

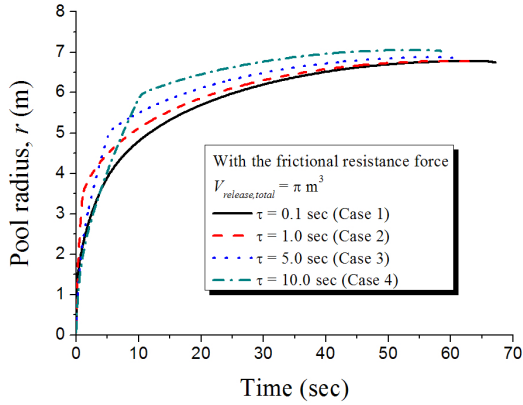


Fig. 3 Pool radius for continuous release in liquid pool spreading model with the frictional resistance term

를 살펴본다. 연속 누출에서 누출 시간 변화에 따른 풀의 부피는 식 (1)과 식 (2)를 수치 해석적으로 풀면 Fig. 2와 같이 얻을 수 있다. Fig. 2에서 보면 액체가 용기로부터 누출되고 있을 때는 액체 풀의 부피는 증가한다. Case 1에서는 누출 시간이 매우 짧기 때문에 액체 풀의 부피가 증가하는 것을 그림 상에서는 확인하기 어렵다. 그러나 용기로부터 누출이 끝난 후에는 용기로부터 풀에 유입되는 액체는 없고 액체 풀에서 주변으로 증발만 일어나기 때문에 액체 풀의 부피는 감소한다.

Fig. 3은 누출 시간에 따른 액체 풀의 반경 변화를 보여 준다. 용기로부터 액체가 누출되는 동안에는 액체 풀의 반경은 급속히 증가한다. 용기로부터 누출이 끝난 후에는 액체 풀의 반경 증가 속도가 현저히 감소한다. 누출 시간이 가장 큰 경우(Case 4)가 누출이 끝나는 시점에서 액체 풀의 반경이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 연속 누출을 가지는 액체 풀의 확산 모델에서 액체 풀의 액체가 모두 증발할 때까지 걸리는 시간 (증발 시간, Vaporization time)을 보여준다. Table 1에서 보면 알 수 있듯이 증발 시간은 누출 시간이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 이런 경향을 가지는 이유는 풀의 반경 변화에서 찾을 수 있다. 식 (1)에서 보면 알 수 있듯이 증발량은 액체 풀

Table 1 Vaporization time for continuous release in liquid pool spreading model with the frictional resistance term

Release time	Vaporization time
0.1sec (Case 1)	67.1sec
1.0sec (Case 2)	64.3sec
5.0sec (Case 3)	61.6sec

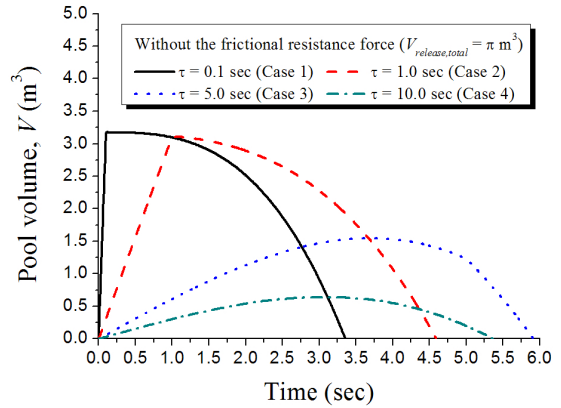


Fig. 4 Pool volume for continuous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

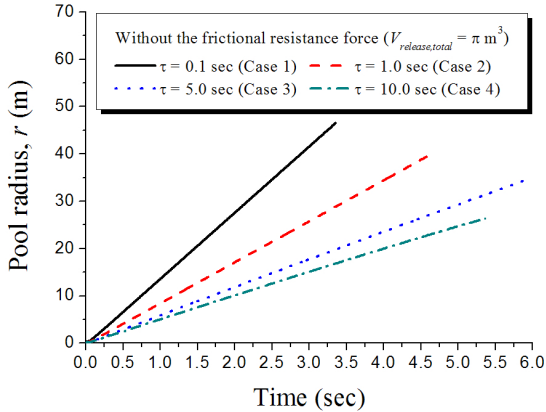
의 표면 면적과 관련이 있다. 즉, 풀의 반경이 증가할수록 증발량은 증가하게 된다. 그러므로 증발 시간은 풀의 반경이 증가할수록 감소하게 된다.

### 3.1.2 마찰저항을 고려하지 않은 액체 풀의 확산

식(2)의 액체 풀의 확산과 관련된 방정식에서 마찰저항은 없고 풀의 확산에 영향을 미치는 인자는 중력에 의한 것만 있는 경우의 액체 풀의 확산에 대하여 살펴보도록 한다. Fig. 4는 마찰저항이 없는 액체 풀의 부피 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 마찰저항이 없는 풀의 부피 변화는 마찰저항이 있는 풀의 부피 변화와 다른 경향을 보인다. Fig. 2의 경우 누출이 완전히 일어난 이후의 부피 변화 경향은 누출 시간에 영향이 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4의 경우에는 누출 시간이 풀의 부피 변화에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 특히 누출 시간이 클 경우에는 용기로부터 액체가 다 누출

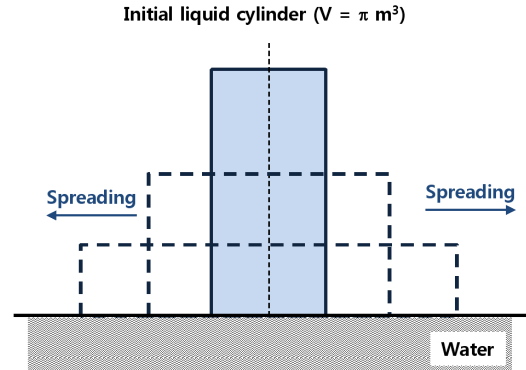
**Table 2** Vaporization time for continuous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

Release time	Vaporization time
0.1sec (Case 1)	3.4sec
1.0sec (Case 2)	4.6sec
5.0sec (Case 3)	5.4sec
10.0sec (Case 4)	5.9sec



**Fig. 5** Pool radius for continuous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

되기도 전에 풀의 부피가 0이 된다. Table 2는 마찰 저항이 없는 연속 누출을 가지는 액체 풀의 확산 모델에서 액체 풀의 액체가 모두 증발할 때까지 걸리는 시간 (증발 시간, Vaporization time)을 보여준다. 표에서 보듯이 마찰저항이 없는 경우 증발 시간은 10초 이내 인 것을 확인할 수 있다. 마찰이 있는 경우는 60여초 인 것과 비교하면 매우 짧은 것을 알 수 있다. 특히 누출시간이 10초인 경우의 증발 시간은 5.9초로 누출시간보다 짧은 것을 확인할 수 있다. 즉, 증발이 빨리 일어나서 액체가 퍼지기도 전에 증발된다는 뜻이다. 또한 누출시간이 짧아질수록 증발시간은 짧아진다. 이는 마찰저항이 있는 경우와 다른 경향임을 알 수 있다. 이러한 경향은 풀의 반경 변화를 살펴보면 이해할 수 있다. Fig. 5는 풀의 반경 변화를 보여준다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 마찰저항이 없는 경우의 풀의 반경은 마찰 저항이 있는 경우의



**Fig. 6** The description of the instantaneous release

풀의 반경보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이는 마찰저항이 없는 경우가 액체가 퍼지는 것이 쉽기 때문이다. 앞서서도 언급하였듯이 증발량은 액체 풀의 면적과 관련이 있으므로 반경이 큰 풀의 증발속도는 클 수 밖에 없다. 이에 따라 마찰저항이 없는 액체 풀의 증발시간이 마찰저항이 있는 액체 풀의 증발시간보다 당연히 작게 되는 것이다.

### 3.2 순간 누출

본 절에서는 순간 누출의 경우 누출 시간에 따른 풀의 확산 현상이 어떻게 다른지를 살펴본다. 본 절에서 고려하는 순간 누출은 Fig. 6에서와 같이 정의된다. 액체를 담고 있는 용기가 갑자기 폭발하게 되면 액체는 Fig. 6에서 보는 바와 같은 실린더 형의 액체 풀에서 확산이 시작된다고 가정할 수 있다. 그러므로 순간 누출의 초기 조건은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$V(0) = \pi r_i^2 h(0) = \frac{V(0)}{\pi r_i^2(0)} = \frac{1}{r_i} \quad (4)$$

본 절에서는 순간 누출 시 초기의 실린더 형의 액체 풀의 크기( $r_i$ )에 따른 영향을 살펴보고자 한다. 또한 순간 누출에서의 풀 확산 현상과 연속 누출에서의 풀 확산 현상을 비교하고자 한다.

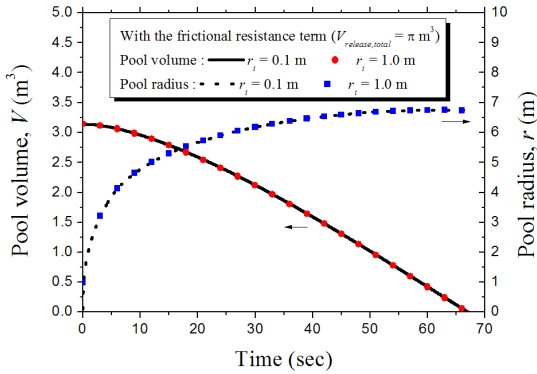


Fig. 7 Pool volume and radius for instantaneous release in liquid pool spreading model with the frictional resistance term

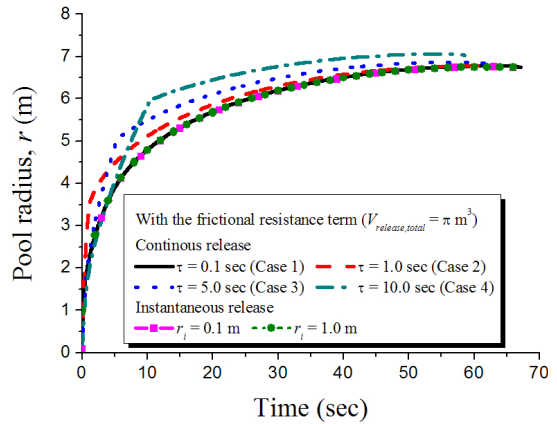


Fig. 9 Pool radius for continuous and instantaneous release in liquid pool spreading model with the frictional resistance term

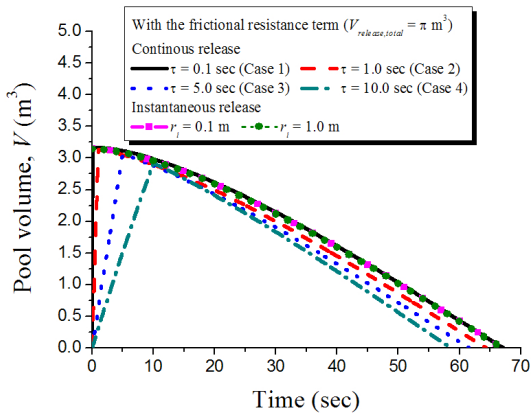


Fig. 8 Pool volume for continuous and instantaneous release in liquid pool spreading model with the frictional resistance term

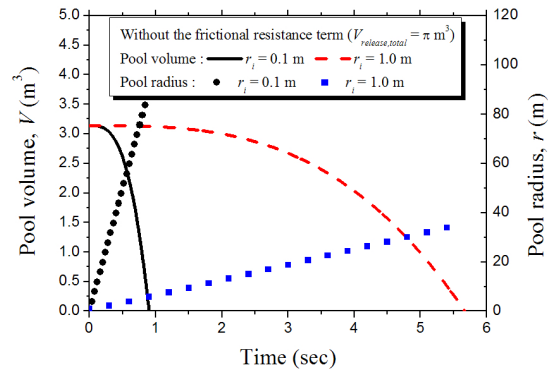


Fig. 10 Pool volume and radius for instantaneous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

### 3.2.1 마찰저항을 고려한 액체 풀의 확산

먼저 액체 풀의 확산에서 마찰저항을 고려한 경우를 살펴본다. Fig. 7은 순간 누출에서 마찰저항이 있는 경우의 액체 풀의 부피 및 반경 변화를 보여 준다. Fig. 7에서 보면 알 수 있듯이 순간 누출에서 초기 조건인 실린더 액체 풀의 크기( $r_i$ )는 액체 풀의 확산에 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8과 9는 순간 누출과 연속 누출의 경우에 풀의 부피와 반경 변화를 비교하여 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 연속 누출에서 누출 시간이 줄어들수록 액체 풀의 부피 및 반경 변화는 순간 누출 경우의 액체 풀

의 부피와 반경 변화에 접근하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 연속 누출에서 누출 시간을 줄이면 액체 풀의 확산 현상은 순간 누출에서의 액체 풀의 확산 현상과 같은 경향을 가짐을 알 수가 있다.

### 3.2.2 마찰저항을 고려하지 않은 액체 풀의 확산

Fig. 10은 순간 누출에서 마찰저항이 없는 경우의 액체 풀의 부피 및 반경 변화를 보여 준다. 마찰저항이 있는 경우와 다르게 초기 조건인 실린더 액체 풀의 크기( $r_i$ )는 액체 풀의 확산에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 초기 실린더의 반경이 작을수록 증

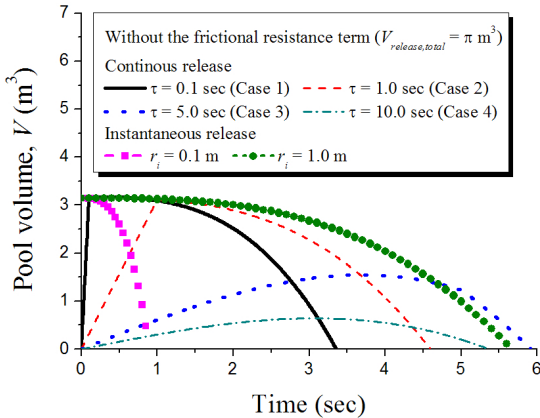


Fig. 11 Pool volume for continuous and instantaneous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

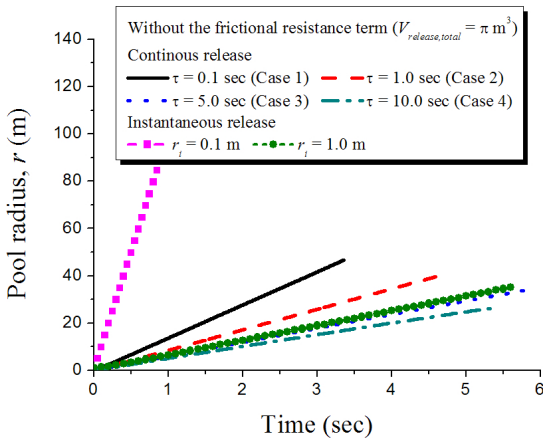


Fig. 12 Pool radius for continuous and instantaneous release in liquid pool spreading model without the frictional resistance term

발이 빨리 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 실린더의 반경이 작을 경우 액체의 높이가 높기 때문에 중력에 의한 확산 Momentum이 커서 액체가 빨리 확산된다. 이에 따라 Fig. 10에서 보는 바와 같이 풀의 반경이 빠른 속도로 커지고 이는 증발량을 크게 하여 증발 시간을 줄여주게 된다. 이에 따라 마찰 저항이 없는 경우의 순간 누출은 초기 조건이 매우 중요한 인자가 되는 것을 알 수 있다. Fig. 11과 12는 순간 누출과 연속 누출의 경우에 풀의 부피와 반경 변화를 비교하여 보여 준다. 마찰 저항이 있는 경우

와 다르게 두 경우에는 큰 연관성이 없는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 마찰저항이 연속 누출과 순간 누출을 가지는 액체 풀의 확산 현상에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 자세한 결론은 다음과 같다.

- 1) 마찰저항이 있는 연속 누출의 경우에 용기로부터 액체의 누출 시간이 길어질수록 액체 풀의 증발 시간은 감소한다.
- 2) 마찰저항이 없는 연속 누출의 경우에는 용기로부터 액체의 누출 시간이 길어질수록 액체 풀의 증발 시간은 증가한다. 또한 누출 시간이 긴 경우에는 액체 풀의 부피가 누출이 끝나기 전에 0이 된다. 이는 증발 시간이 매우 빠르기 때문에 생기는 현상이다.
- 3) 마찰저항이 있는 순간 누출의 경우에는 초기 풀의 크기는 액체 풀의 확산 현상에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 4) 마찰저항이 있는 연속 누출에서 누출 시간이 줄어들수록 액체 풀의 확산 현상은 순간 누출에서의 액체 풀의 확산 현상과 같은 경향을 가진다.
- 5) 마찰저항이 없는 경우 연속 누출에 의한 액체 풀의 확산 현상은 순간 누출에 의한 액체 풀의 확산 현상과 다른 경향을 가진다.

#### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력 사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2012K001437)

## References

1. A. G. Venetsanos, and J. G. Bartzis, "CFD Modeling of Large-scale LH2 Spills in Open Environment", International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 2005, pp. 125-136.
2. W. Stein, and D. L. Ermak, "One-dimensional Numerical Fluid Dynamics Model of the Spreading of Liquefied Gaseous Fuel (LGF) on Water", UCRL-53075, Lawrence Livermore National Laboratory, 1980.
3. K. Verfondern, and B. Dienhart, "Experimental and Theoretical Investigation of Liquid Hydrogen Pool Spreading and Vaporization", Int. J. Hydrogen Energy, 22, No. 7, 1997, pp. 649-660.
4. J. Brandeis, and E. Kansa, "Numerical Simulation of Liquefied Fuel Spills: I. Instantaneous Release into a Confined Area", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 3, 1983, pp. 333-345.
5. J. Brandeis and D. Ermak, "Numerical Simulation of Liquefied Fuel Spills: II. Instantaneous and Continuous LNG spills on an Unconfined Water Surface", Int. J. Numer. Meth. Fluids, 3, 1983, pp. 347-361.
6. U. S. Federal Energy Regulatory Commission (FERC), "Notice of Availability of Detailed Computations for the Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers", FERC Docket no AD04-6-000, 2004.
7. C. J. H. van den Bosch, and R. A. P. M. Weterings, "Methods for the Calculation of Physical Effects (TNO Yellow Book)", 3rd Ed, 1997, TNO, The Hague, The Netherlands.